

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TERMO-MECÁNICO DE LAS PRESAS CONDOR CLIFF Y LA BARRANCOSA

P. Kucich¹, G. Sal Anglada¹, C. Rocco¹

¹*Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina
paulakucich2012@gmail.com*

INTRODUCCIÓN

En el hormigón, al entrar en contacto los componentes del cemento y el agua durante el mezclado, se producen las denominadas reacciones de hidratación, que tienen la característica de ser exotérmicas. En consecuencia, durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón, se genera calor debido a las reacciones químicas y aumenta la temperatura en el material.

Las estructuras se encuentran en contacto con los fluidos del ambiente como el aire, agua, etc., que en general se encuentran a menor temperatura en esta etapa temprana del material. Debido a esto, las zonas externas de la estructura alcanzarán una menor temperatura que las zonas internas, generándose así gradientes térmicos entre ambos puntos de la pieza.

Los gradientes térmicos se traducen en deformaciones, y estas últimas en tensiones. Según sea el grado de restricción de la estructura, se pueden alcanzar valores tensionales que superen la resistencia a tracción del material, generándose de esta forma las fisuras que tienen origen en el comportamiento térmico del hormigón.

El material evoluciona de un estado fresco donde la mezcla tiene cierto grado de fluidez, a un estado endurecido una vez finalizado el proceso de fraguado. Esto implica que las propiedades mecánicas varían fuertemente durante dicho proceso lo que tiene fundamental importancia en los fenómenos de fisuración en edad temprana.

Una presa es una estructura de gran envergadura, considerada una estructura de Hormigón Masivo. El American Concrete Institute (ACI) define al hormigón masivo como todo volumen de hormigón cuyas dimensiones son lo suficientemente grandes como para que sea necesario tomar medidas en relación a la generación del calor de hidratación del cemento y a los consiguientes cambios de volumen deforma tal de minimizar la fisuración. Es importante entonces, realizar un estudio térmico de este tipo de estructuras, ya que las fisuras pueden tener consecuencias graves como generar filtraciones, afectar la durabilidad, comprometer el comportamiento dinámico de las estructuras en servicio, etc.

En este trabajo se realizó un análisis térmico – mecánico para la construcción de las presas Condor Cliff y La Barrancosa. El estudio se dividió en dos etapas, en primer lugar, se realizó un análisis térmico y luego, con los valores de temperatura obtenidos, se procedió a realizar el modelo mecánico para el análisis de tensiones.

Se realizó un modelo de elementos finitos mediante el software Abaqus en el cual se analizó el proceso constructivo por etapas de la presa y la evolución de temperatura y tensiones en la misma.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Para el análisis térmico y mecánico se ha considerado como estructura de referencia el Muro de Cierre del Margen Derecha de la Central La Barrancosa, analizando el monolito de mayor altura. Este resulta ser el más comprometido en cuanto a parámetros térmicos y mecánicos.

Como estado de carga del modelo térmico se consideró el calor de hidratación del cemento, para distintas cantidades, y para el modelo mecánico se empleó la evolución de temperatura obtenida en el modelo térmico.

Se analizaron ocho casos considerando diferentes cantidades de cemento, para dos tipos de hormigones (H17 – Núcleo; H25 – Revestimiento), dos fechas de inicio de obra (junio y diciembre) y dos lapsos entre colocación de las 20 capas con las que se conforma el modelo (5 y 15 días). El tiempo total de análisis es de 360 días.

		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
Contenido de Cemento	H17	200	240	200	240	200	240	200	240
	H25	320	320	320	320	320	320	320	320
LAPSO E/CAPAS		15	15	5	5	15	15	5	5
INICIO OBRA		VERANO	VERANO	VERANO	VERANO	INVIERNO	INVIERNO	INVIERNO	INVIERNO

Para la resolución del problema se empleó un modelo bidimensional termo-mecánico desacoplado. Este tipo de modelos consiste en realizar una simulación térmica en la que se determina la evolución temporal de la temperatura en el hormigón, afectada por el calor de hidratación del cemento y las condiciones de contorno. Luego esos valores de temperatura se constituyen en estados de carga para el modelo mecánico del elemento estructural.

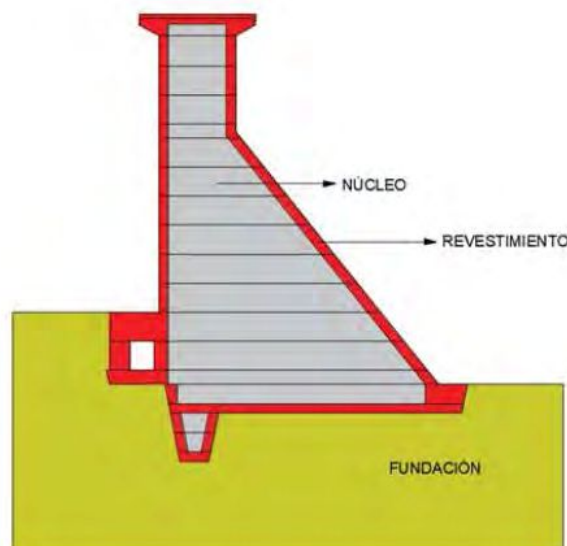


Figura 1. Geometría estudiada

El modelo consistió en veintiún partes, correspondientes a cada capa de hormigón y a la fundación. A su vez, cada parte correspondiente a cada capa de hormigón está conformada por un núcleo de hormigón H17 y un revestimiento de hormigón H25.

La malla de elementos finitos utilizada es de un tamaño de elemento de aproximadamente 200 mm para la presa en sí, mientras que la parte correspondiente a la fundación varía la malla a medida que se aleja de la presa, llegando a un tamaño de elemento de aproximadamente 1000 mm.

MODELO TÉRMICO

El estado de carga del modelo térmico consistió en el calor liberado a partir del proceso de hidratación del cemento. Durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón se libera calor generado por la hidratación de los distintos componentes del cemento utilizado en la mezcla. Esta liberación de calor se modela en Abaqus como un flujo de calor volumétrico uniformemente distribuido en la capa de hormigón. Para esto se tuvieron en cuenta las curvas calorimétricas de ambos tipos de hormigones (núcleo y revestimiento).

Densidad [kg/mm ³]	2.51E-06
Calor Específico [kcal/kg. °C]	0.23
Conductividad térmica [kcal/mm.s. °C]	5.79E-07

Tabla 1 – Propiedades térmicas del hormigón

Como condiciones de contorno se incorporó la interacción con el aire a temperatura ambiente durante todo el tiempo de análisis (modificando también la temperatura de la fundación para cada caso). En los contactos entre partes se consideró conducción perfecta del calor. La temperatura externa considerada en el modelo será la temperatura ambiente en función del tiempo. Se impuso convección con el aire en las superficies laterales del muro y, por otro lado, en la superficie superior de cada capa antes de la colada de la siguiente. Luego de ubicada la capa siguiente, la condición de convección superficial se desactiva.

Para simular el contacto entre dos partes del modelo (entre las distintas capas de hormigón y con la fundación), se definió un vínculo entre ambas. Este vínculo permite que las partes que están en contacto se mantengan independientes entre sí, pero permite la transferencia de calor entre ellas. El algoritmo de contacto que se utiliza no permite penetraciones entre las partes. Se impusieron vínculos entre las capas de hormigón adyacentes y con la fundación.

Se definieron como campos predefinidos la temperatura inicial de la fundación y la temperatura de colocación de hormigón (ambas 10°C). Se plantearon condiciones de borde del tipo térmicas y mecánicas en la fundación. Se asignó una temperatura fija en los límites de la fundación y se restringió su desplazamiento. Para las inmediaciones de la presa no se asignó temperatura constante en la roca ya que se presume que se verá afectada por la generación de calor del hormigón durante la construcción.

Para simular la construcción del muro se utilizaron interacciones del tipo Model Change, donde las partes del modelo aparecen a medida que avanza el tiempo de análisis. Se definieron 20 interacciones, una para cada capa del muro.

RESULTADOS DEL MODELO TÉRMICO

Se analizaron las temperaturas máximas y mínimas que alcanza cada caso y las capas en las que se alcanzan.

- Temperaturas máximas:

- a) La temperatura máxima alcanzada es de 44 °C, obtenida en los casos 3 y 4: "Verano – 5 días".
- b) Según la predicción del modelo, las máximas temperaturas ocurren a una edad comprendida entre 2 y 5 días a partir del inicio del fraguado del hormigón.
- c) Las temperaturas pico se alcanzan en la Capa 8 en todos los casos.

- Temperaturas mínimas:

- a) La temperatura mínima alcanzada es de 1.64 °C, alcanzada en los casos 1 y 2: "Verano – 15 días".
- b) Las temperaturas mínimas se alcanzan en las capas 15 y 16.

MODELO MECÁNICO

El tipo de análisis realizado fue elástico lineal, es decir no se consideró daño ni presencia de fisuras. Se considera el peso propio de la presa.

En lo que respecta a las propiedades mecánicas de los materiales, en un análisis elástico lineal en el que se determinan tensiones por efectos térmicos, es necesario contar con el módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y el coeficiente de expansión térmica.

Para la presa se utiliza un **hormigón H25** para el revestimiento, con una resistencia media a la compresión a la edad de 28 días de 25 MPa, un módulo de elasticidad a 28 días de 23500 MPa, un módulo de Poisson 0.2, un coeficiente de expansión térmica $1.0 \times 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ y la resistencia a la tracción a 28 días de 2.36 MPa.

Para el núcleo se utiliza un **hormigón H17**, con una resistencia media a la compresión a la edad de 28 días de 17 MPa, un módulo de elasticidad a 28 días de 19500 MPa, un módulo de Poisson 0.2, un coeficiente de expansión térmica $1.0 \times 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ y la resistencia a la tracción a 28 días de 1.82 MPa.

Para la fundación se adoptó un Módulo de Elasticidad de 1500 MPa. Se consideró que el módulo de elasticidad del hormigón varía en el tiempo, lo que permite analizar más adecuadamente el estado tensional a edad temprana. Por lo que para calcular el valor del módulo de elasticidad se empleó la siguiente fórmula:

$$E_c(t) = E_{c28} \left(e^{\left\{ 0.28 \left(1 - \left(\frac{28}{t+1} \right)^{0.5} \right) \right\}} \right)^{0.5}$$

donde $E_c(t)$ es el módulo de elasticidad al tiempo t , E_{c28} es el módulo de elasticidad a 28 días y el tiempo se ingresa en días. Para tener en cuenta el efecto del creep, se introduce el denominado Módulo de Elasticidad Sostenido, cuyo valor es menor que el Módulo de Elasticidad Estático:

$$E_{c_{sost}}(t) = \frac{1}{\left[0.94 + \frac{\log(t+1)}{\beta}\right]} E_c(t)$$

en la cual $E_c(t)$ es el módulo de elasticidad al tiempo t , y β es un factor de ajuste de tal forma que $E_{c_{sost}}(365) / E_c(365) = 0.65$, en este caso $\beta=4.3$. La resistencia a compresión en función del tiempo se obtiene con la siguiente expresión:

$$f_t(t) = \alpha 1.7 \left[\frac{f_{c28} e^{\left\{ 0.20 \left(1 - \left(\frac{28}{t/t_1} \right)^{0.5} \right) \right\}}}{12} \right]^{2/3}$$

donde $f_t(t)$ es la resistencia a la tracción al tiempo t , f_{c28} es la resistencia a la compresión a 28 días, t_1 es 1 día, un parámetro de ajuste que se adoptó igual a 0,79 y el tiempo se ingresa en días.

El estado de carga en el modelo mecánico consistió en la evolución térmica de la temperatura obtenida como resultado de la simulación térmica.

RESULTADOS DEL MODELO MECÁNICO

Se analizan las zonas donde se supera la resistencia a tracción en algún instante del análisis según el hormigón (2.36 MPa para H25 y 1.82 MPa para H17). Luego, se toma un elemento de cada zona marcada y se analiza la curva de tensiones en función del tiempo, comparándola con la curva de resistencia a tracción del hormigón. De esta forma se determina si en algún momento fue superada la resistencia a tracción.

Pudo observarse que en todos los casos se supera la resistencia a tracción del hormigón, por lo tanto, se generarán fisuras, especialmente en el revestimiento. Dichas fisuras son predominantemente en la dirección 2-2.

También se observaron picos de tracción en la superficie de cada capa, los cuales se generan durante los primeros días luego del hormigonado, hasta la aparición de la siguiente capa.

CONCLUSIONES

Habiéndose realizado un modelo térmico – mecánico para un monolito genérico de las presas Condor Cliff y La Barrancosa, donde son considerados los tipos de hormigón a utilizar (con sus respectivas características térmicas y mecánicas), la variación de las condiciones climáticas a lo largo del año, las interacciones entre las distintas tongadas y la fundación y el aporte en el control de fisuras de las armaduras de refuerzo; se puede afirmar que la secuencia constructiva, con espesores de tongadas de 3.00m, es adecuada para el tipo de estructura analizada.

Las temperaturas alcanzadas tanto en el hormigón del núcleo como en el de revestimiento se mantienen en los rangos aceptables.

Por otro lado, se aclara que se espera un escenario de posibles fisuraciones superficiales a edad temprana que serán controladas por la armadura mínima dispuesta. Se estima que la separación entre las fisuras será de aproximadamente 2.50m y los anchos serán menores a 0.6mm cuando las tensiones son máximas y menores a 0.4mm después de 28 días de hormigonado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABAQUS, User's Manual Version 6.13, Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc, 2014.
- [2] American Concrete Institute. ACI-207 Mass Concrete, 1998.
- [3] Thermal studies of mass concrete structures. Technical Letter N°1110-2-542 Army Corps of Engineer, 1997.
- [4] TUTORIAL, Análisis computacional de problemas termo-mecánicos en el hormigón. Ing. Rafael Lamattina, 2014.
- [5] Reglamento CIRSOC 201-2005 "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón". INTI, 2005.